

「電流による発熱量」の実験に使用する電源装置の検討

小 山 久 栄

この研究は、中学校理科第1分野の「電流による発熱量」の実験において、しばしば使われている脈流を出力する電源装置を取り上げて、この目的のために使用することが本質的に誤りであることを、自作のアナログ2乗演算装置を使って実証した。

そこで、波形率が1の2種類の直流電源装置を試作し、その特性を比較検討した結果、平滑形電源装置より直流安定化電源装置が優れていることを確認した。

1 はじめに

中学校理科第1分野における「電流による発熱量」の実験の電源として、従来から使われてきた蓄電池の代わりに、脈流を出力する電源装置がしばしば使われている。ところが、この電源装置を使う限り、理想的な熱量計を使ったとしても、熱の仕事当量 J は必ず期待値より小さくなる。これは実験上の偶然誤差ではなく、電源の特性に由来する計器誤差である。すなわち、蓄電池から出力される直流はリップルを含まないのに対し、電源装置から出力される直流は脈流であるという相違である。

本研究は、この異なる2つの直流の違いから派生する電力値の違いを、実測によって解明した。その結果、波形率が1である直流電源、すなわち、リップルを含まない電源装置の必要性を認め、それに近い直流を出力する電源装置を試作して「電流による発熱量」の実験を行ったところ、かなりよい熱の仕事当量 J が得られたので報告する。

2 電源装置の特性と問題点

(1) シリコン整流器の特性と整流波形

整流器に使われているダイオードはシリコンやセレンで作られている。これらの整流素子は理想的な整流特性を示さず、例えばシリコン整流素子の場合には、順方向電圧が0.6Vのあたりから順方向電流が指数関数的に流れ始める¹⁾。従って動特性は、図1に示すように正弦波の1/2周期ごとの折り返しにはならず、特に低電圧のところに内部抵抗による影響が現れる。その様子をシンクロスコープで観測した波形を図2に示した。(縦軸は電圧、横軸は時間)

図2から、「電流による発熱量」の実験で、脈流

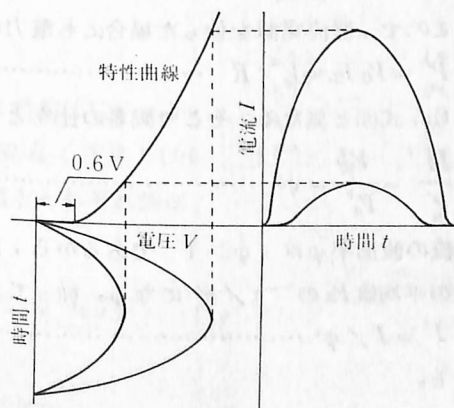


図1 Siダイオードの順方向特性

の出力電圧を変えていくと波形率が変わることがわかる。
 このように波形率が変わるという条件の中で、発熱量と
 電力量の関係を調べることは無理である。

(2) リプルを含む直流の計測

(a) 波形率

正弦波交流を整流して得られた脈流の電圧実効値 V_{eff}
 電流実効値 I_{eff} と、それぞれの平均値 V_a 、 I_a の比(波形
 率)を φ とすると

$$\varphi = \frac{V_{eff}}{V_a}, \quad \varphi = \frac{I_{eff}}{I_a} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(b) 脈流

本来、直流電圧計や直流電流計はリプルを含まない直
 流電圧や直流電流を測定する計測器である。これらの計
 測器で正弦波交流に理想的な整流を行って得た脈流電
 圧や脈流電流を測定すると、全波整流された波形の平均値 V_a 、 I_a が得られる。

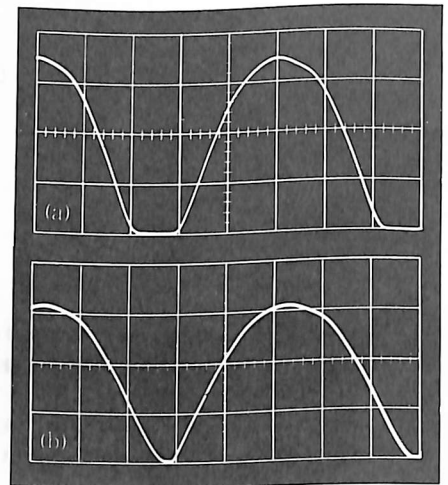


図2 Si 整流素子による全波整流波形
 縦軸は出力電圧，(a)は1 V，(b)は
 10 V。横軸は時間。(電流は1 A)
 2)

(3) リプルを含まない直流電力と脈流の電力

リプルを含まない直流電源に抵抗 R を接続した場合、抵抗で消費される電力 P は式(2)で示される。

$$P = VI = \frac{V^2}{R} \quad \dots\dots\dots (2)$$

一方、脈流の電力の平均値 P_a は式(3)で示される。

$$P_a = \sum \frac{V_i I_i}{t_i} = \frac{1}{Rt} \sum V_i^2 = \frac{(V_i^2)_a}{R} = \frac{V_{eff}^2}{R} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 V_i は極めて短時間 t_i に抵抗 R に印加される電圧、 I_i はそのときに流れる電流、 $(V_i^2)_a$ は
 V_i の2乗の平均値である。

ところで、脈流電源を使った場合にも電力の平均値 P_a を式(2)で計算すると、

$$P'_a = V_a I_a = V_a^2 / R \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、式(3)と異なる。そこで両者の比をとると、

$$\frac{P_a}{P'_a} = \frac{V_{eff}^2}{V_a^2} = \varphi^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

脈流の波形率 φ は、 $\varphi > 1$ であるから、計測器の指示値から求めた電力 P'_a は、実際に消費された
 電力の平均値 P_a の $1/\varphi^2$ になる。従って、式(4)の方法で求めた熱の仕事当量 J' は、

$$J' = J / \varphi^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

になる。

3 脈流の電力量

シリコン整流器で脈流を出力する電源装置から得られる脈流の波形は図1, 2に示したように理想的な正弦波交流波形ではないので, アナログ2乗演算装置を試作して, 極めて短時間に純抵抗に印加される電圧 V_i の2乗を求め, 電圧計でその平均値を近似的に読み取った。

(1) アナログ2乗演算集積回路の概要³⁾

この測定にはアナログデバイス社の集積回路AD533Kを用いた。この集積回路はバイポーラ型トランジスタの順方向コレクター電流と相互コンダクタンスが直線的な関係にあるという性質を利用して, 入力信号の2乗に比例した出力が得られるように設計されたものである。特性を表1に装置の回路を図3に示す。

(2) 2乗演算装置の精度測定

2乗演算装置の精度測定は図4の系統図に示すように, 直流安定化電源装置（高砂製作所GPO50-2（出力電圧変動率0.005%+3mV））からリプルを含まない直流電圧を本装置の演算用入力端子に印加し, 入力電圧と出力電圧はデジタルボルTMーターでそれぞれ測定した。

表1 AD533Kの特性（25℃）	
使用電圧 V_S	: 安定化電圧 $\pm 15V$
演算電圧 X_{IN}	: $0 \sim 20V$ (P-P), $f = 50Hz$
関数発生特性	: $X^2/10$
誤差	: $\pm 0.4\%$

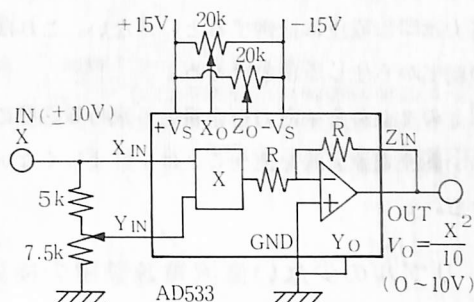


図3 2乗演算装置の回路図

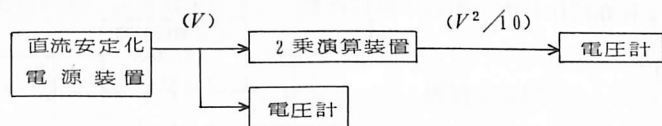


図4 2乗演算装置の精度試験系統図

測定結果を表2に示す。

この結果から, 本装置による2乗演算は有効数字3けたの範囲まで計算値とよく一致することが確認された。

表2 2乗演算装置の精度測定

入力電圧(V)	出力電圧(V)
1.029	0.106
2.02	0.408
3.00	0.901
3.99	1.588
5.04	2.54
6.02	3.62
7.00	4.90
8.05	6.47
9.02	8.14
10.01	10.00

(3) 脈流の電力測定

「電流による発熱量」の実験を想定して脈流電源装置に負荷抵抗（スライド抵抗）を接続して, 印加平均電圧 V_a , 流れる平均電流 I_a （便宜上1.00Aに調節した。），電圧実効値の2乗 V_{eff}^2 を10で除した値をそれぞれ測定した。測定系統図を図5に示す。

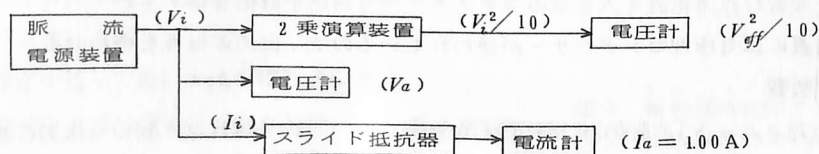


図5 脈流電流の電力測定系統図

(4) 結果と考察

測定値から平均電力 $P_a (=V_{eff}^2 / R = V_{eff}^2 I_a / V_a)$ と, $P'_a (=V_a I_a)$ を求めてグラフ化した。(図6)

このグラフから, 次の2点が指摘できる。

- ① 式(2)は脈流電源を使用する場合には適用できない。
すなわち, 実際に消費される脈流電力 P_a が, 式(2)を使うことによって波形率 ϕ の2乗で除した値になって算出される。
- ② 平均電力 P_a と印加電圧 V のグラフの傾きが1にはならない。従って, 単純に, 電流が一定の場合には平均電力は印加電圧に比例するといえない。これは波形率の変化から生じる現象である。

以上の2点から, 電力を定量的に求める必要のある実験に, 脈流電源装置を使うことは, 好ましくないと結論づける。

4 リプルの少ない直流電源装置の検討

商用電源の利用と教材費の使用を前提として, 製作容易なりプルの少ない直流電源装置を2種類試作して, その特性を比較検討した。

1) 装置の概要

(a) 平滑装置¹⁾

装置は, 図7(a)に示すように, 脈流電源装置に, コンデンサーと低周波チョークコイルを付加したものである。

この付加装置の平滑原理は次の3点からなっている。

- ① 脈流電源装置から出力された脈流電流を大容量のコンデンサーで平滑化をはかる。

- ② ①の回路に直接負荷抵抗を接続して電流を流した場合,

流れる電流が大きいほどリプルが増大する。そこで, 低周波チョークコイルによる誘導電流を利用して, リプルの減少をはかる。

- ③ 減少したリプルを含む直流電流を大容量のコンデンサーで再び平滑化をはかる。

なお, この付加装置には有極性コンデンサーが使われているので, 直流の極性を合わせる。

(b) 直流安定化電源装置

装置はN社製, 電源ユニット「直流安定化電源(C)」を利用した。この装置は図7(b)の系統図に示すように, 一見, コンデンサー入力形平滑回路に似た回路構成であるが, 相違点は, 低周波チョークコイルの

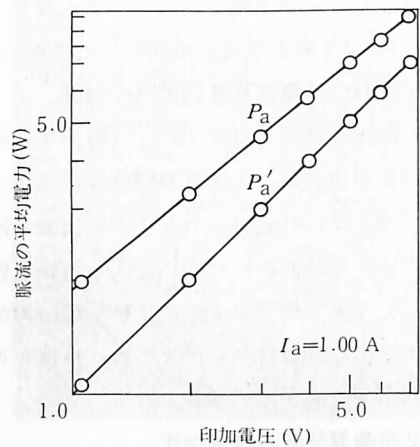


図6 脈流電力の理論的な相違

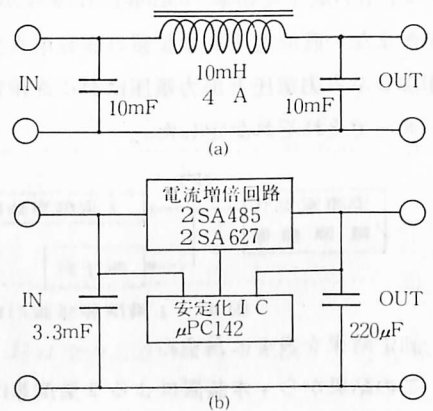


図7 リプルの少ない直流電源装置
(a)は平滑形直流電源装置, (b)は直流定電圧電源装置

代わりに、安定化電源集積回路と電流増倍回路を備えていることである。この2つの回路は前記の平滑形電源装置の平滑原理②を次のように変えている。すなわち、かなり平滑化した非安定な直流から、集積回路の中にある定電流電源回路より得られた定電流を基準にして、安定化した電圧を得ている。出力電圧は0～30 Vで、外付け可変抵抗器でおよそ、2 V/k Ω の設定をしている。

しかし、ここから出力される電流は小さいので、大小2個のトランジスターをダーリントン接続した電流増倍回路で、大きい電流の流せる安定化電圧を出力している。

なお、この電源ユニットには、ブリッジ形シリコン整流器が取り付けられている。又、集積回路に内蔵してある過電流制限回路が作動するような配慮もなされている。

(2) 特性と考察

(a) リプル含有特性

一般にリプルは負荷抵抗に流れる電流が大きいほど大きい。ここでは「電流による発熱量」の実験にしばしば使われる電流値を想定して、特に、電流値1 Aと3 Aの場合について、出力電圧とリプル含有特性の関係を調べた。

リプル電圧の測定にはシンクロスコープ(岩崎通信機製SS5302)の0.05 V/cmレンジを用いて、リプル波形のP-Pを目測した。(図8)

図8から次の2点が指摘できる。

- ① リプル含有率は低電圧ほど大きい。
- ② 熱の仕事当量を2けたまで求める場合、リプル含有率はほとんど影響しない。

(b) 電圧変動特性

負荷抵抗を変えることにより電流が変化する。その場合の、印加電圧の変動を調べた。

電流変化に伴う印加電圧の変動はXYレコーダーを使って記録した。(図9)

この測定を通して次の2点を指摘できる。

- ① 測定中、平滑装置を付加した直流電源装置は電源電圧の変動による影響を受けたが、直流安定化電源装置

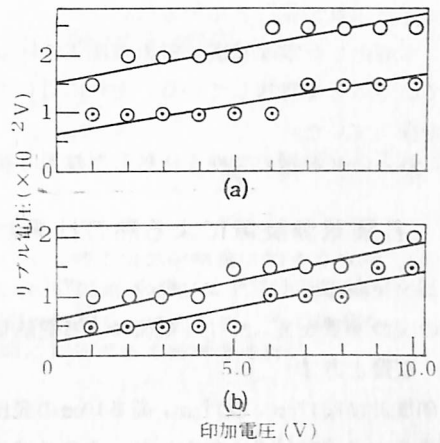


図8 リプルの含有特性
(a)は平滑形直流電源装置のリプル
(b)は直流安定化電源装置のリプル

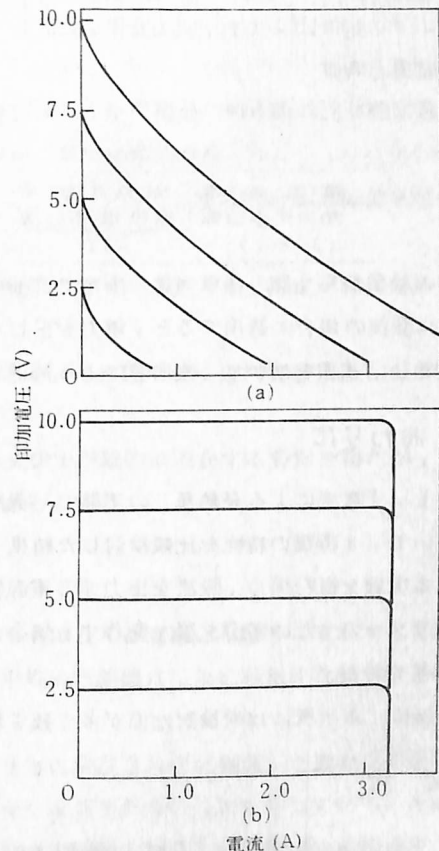


図9 電流変動に伴う電圧変動特性
(a)は平滑形直流電源装置
(b)は直流安定化電源装置

ではその現象が見られなかった。

- ② 平滑化した電源装置は電流の変化に伴って、電圧も変動した。これは電源装置の内部抵抗が影響していることを意味している。それに対して、直流安定化電源装置では電流の変動に関係なく、定電圧を保っていた。

これらの2機種の特性を比較した結果、後者の電源装置が優れていると結論づけられる。

5 各種電源装置による熱の仕事当量の測定

脈流電源装置(シリコン整流)、アルカリ蓄電池、平滑形直流電源装置、直流安定化電源装置の4種類の電源装置を使って、「電流による発熱量」の実験を行い、熱の仕事当量を求め、比較してみた。

(1) 装置と方法

熱量計は縦17cm、横17cm、高さ10cmの発泡スチロール塊の中に300mlのサーモカップを埋め込み、厚さ3cmの同材料のふたをした。ふたには1.5mmのホルマル線で、導線及びかくはん棒を作って取り付け、導線には6.58Ωのニクロム線を接続した。温度計は(1/10)度目盛の水銀温度計を使った。

測定は5.00Vの電圧を10分間印加し、流れる電流と温度上昇分を計測した。

データの処理は、式(2)、式(4)を用いた。

(2) 結果と考察

各種電源装置による熱の仕事当量 J の測定結果を表5に示す。

表5 電源装置の種類と熱の仕事当量

電源装置	Si整流器使用	アルカリ	平滑装置付加	直流安定化
熱の仕事当量	脈流電源装置	蓄電池	直流電源装置	電源装置
(J/cal)	3.1	4.2	4.3	4.3

この結果から、熱の仕事当量の測定で式(2)が適用できるのはリップルを含まない電源の場合で、式(4)のように脈流の場合に適用すると、電力を正しく算出できないことが実証された。

しかし、式(6)を用いて、波形率による補正を行うと、熱の仕事当量 J は4.1J/calが得られた。

6 おわりに

以上、「電流による発熱量」の実験で、発熱量が電力量に比例することを見出すのに適した電源装置について、3種類の特性を比較検討した結果、次の2点を勧める。

- ① 本実験を組む場合、脈流を出力する電源装置より、リップルの少ない電源装置を使用すべきである。
② リップルの少ない電源装置を製作する場合には、構造がやや複雑であるが、安定化電源装置を製作すべきである。

最後に、本研究には未検討な面が多く残されている、御批判、御指導をいただければ幸いである。

文 献

- 1) 星公正治編：電子回路ハンドブック，丸善(1963)5,728 2) 原田義富編：横河技報，18,6(1964)13
3) Analog Devices Semiconductor: A PRACTICAL GUIDE TO APPLYING I.C. MULTIPLIERS, (1974) 1~3